

# ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОБРАЗОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ ИЗГИБЕ

Кольцун Ю.И.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Известно, что процесс образования и роста усталостной трещины сопровождается пластическими деформациями на вершине ее фронта. Считается, что эффект влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости в этом случае исчезает. В то же время практика эксплуатации деталей показывает, что сжимающие остаточные напряжения затрудняют не только продвижение дислокаций к поверхности, но и рост трещины. Возникает вопрос: как объяснить влияние остаточных напряжений на развитие трещины, точнее, какова связь между коэффициентом интенсивности напряжений, в частности  $K_I$ , и осевыми остаточными напряжениями  $\sigma_z^{осм}$ ? Логический ответ на этот вопрос можно предложить, если представить напряжения на вершине фронта трещины, выраженные через коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$ , как предел выносливости материала по образованию первой макротрещины  $\sigma_{-1}^{TP}$  [1] при изгибе, с учетом дополнительных напряжений  $\sigma_{дон}$ , возникающих при появлении трещины в поле остаточных напряжений [2,3].

$$\sigma_{-1}^{TP} = \frac{K_I}{\sqrt{\pi \cdot l} f(\Theta)}, \quad (1)$$

где  $l$  - глубина усталостной трещины,

$f(\Theta)$  - поправочная функция.

В свою очередь, выражение предела выносливости по образованию первой макротрещины при изгибе с учетом уточнений имеет следующий вид:

$$\sigma_{-1}^{TP} = \frac{2H(\Theta_{\max})}{d} \cdot \sigma_{Ra} \cdot \frac{\alpha_\sigma(2H(\Theta_{\max}))}{K_\sigma(d) \cdot K_\sigma(\alpha_\sigma(2H(\Theta_{\max})))} \cdot \frac{K_d(d)}{K_d(2H(\Theta_{\max}))}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{Ra} = \sigma_{-1} - \bar{\psi}_\sigma \cdot \left( \bar{\sigma}_{осм} + \sigma_{дон} \right)$  - амплитуда предельных напряжений;

$\sigma_{-1}$  - предел выносливости материала;  $\bar{\psi}_\sigma \cong 0,36$  - коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости материала при изгибе;  $\bar{\sigma}_{осм}$  - критерий остаточных напряжений;  $\sigma_{дон}$  - дополнительные напряжения, возникающие при перераспределении остаточных напряжений в случае возникновения усталостной трещины;  $d$  - диаметр опасного

сечения;  $H$  - расстояние между фронтами двух симметрично расположенных серповидных нераспространяющихся усталостных трещин;  $\alpha_\sigma(\Theta_{\max})$  - теоретический коэффициент концентрации напряжений, определяемый в вертикальной секущей плоскости в точке остановки фронта трещины на контуре опасного сечения при текущей угловой координате  $\Theta_{\max}$ ;  $K_\sigma$  - эффективный коэффициент концентрации напряжений на уровне диаметра опасного сечения  $d$  и  $2H(\Theta_{\max})$  соответственно;  $K_d$  - коэффициент влияния абсолютных размеров детали на уровне  $d$  и  $2H(\Theta_{\max})$ .

В краткой форме

$$\sigma_{-1}^{TP} = \frac{2H(\Theta_{\max})}{d} \cdot (\sigma_{-1} - \bar{\psi}_\sigma \cdot (\bar{\sigma}_{ocm} + \sigma_{\partial on})) \cdot K(\alpha_\sigma, K_\sigma, K_d), \quad (3)$$

где  $H(\Theta_{\max}) = \frac{d}{2} \cdot \cos \Theta_{\max}$ ;  $\bar{\sigma}_{ocm}$  - критерий остаточных напряжений, учитывающий их распределение по толщине залегания в пределах критической глубины нераспространяющейся усталостной трещины  $t_{кр}$ ;  $\sigma_{\partial on}$  - дополнительные остаточные напряжения, возникающие в результате появления трещины.

На рис. 1 изображен полуэллиптический концентратор с полуосями  $a, b$  и трещина глубиной  $t_{кр}$ .

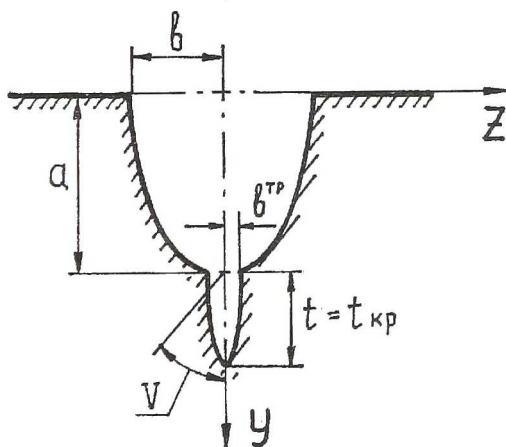


Рис. 1. Полуэллиптический концентратор

Критерий остаточных напряжений описан в работе [3] имеет следующий вид:

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_{ocm}(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (4)$$

где  $\xi = \frac{y}{t_{кр}} = \cos V$ ,  $y$  - текущая координата.

В соответствии с рис.1 дополнительные остаточные напряжения [4] вычисляются по формуле

$$\sigma_{don} = \frac{2(1+c)}{1-c} \cdot \bar{\sigma}_{ocm}, \quad (5)$$

где  $c = \frac{t-b^{TP}}{t+b^{TP}}$ .

Учитывая (5), после математических преобразований выражение (3) принимает следующую форму:

$$\sigma_{-1}^{TP} = \left( \sigma_{-1} - \bar{\psi}_{\sigma} \cdot \left( 1 + 2 \cdot \frac{t}{b^{TP}} \right) \cdot \bar{\sigma}_{ocm} \right) \cdot K(\alpha_{\sigma}, K_{\sigma}, K_d) \cdot \cos \Theta_{\max}. \quad (6)$$

Однако, в выражении (6) сумма  $\left( 1 + 2 \cdot \frac{t}{b^{TP}} \right)$  есть ни что иное, как теоретический коэффициент концентрации напряжений на дне трещины  $\alpha_{\sigma}^{TP}$ , выведенный Нейбером для эллиптического концентратора. После подстановки выражения (6) в формулу (1) получим следующее соотношение:

$$\sigma_{-1}^{TP} = \left( \sigma_{-1} - \bar{\psi}_{\sigma} \cdot \alpha_{\sigma}^{TP} \cdot \bar{\sigma}_{ocm} \right) \cdot K(\alpha_{\sigma}, K_{\sigma}, K_d) \cdot \cos \Theta_{\max} = \frac{K_I}{\sqrt{\pi \cdot l f(\Theta)}}. \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что с увеличением сжимающих (отрицательных) остаточных напряжений предел выносливости по образованию первой макротрещины увеличивается, что приводит к увеличению коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$ . Кроме этого в пределах толщины поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями возникновение усталостной трещины способствует повышению эффективности работы детали. Превышение глубиной трещины толщины залегания сжимающих остаточных напряжений приводит к немедленному разрушению детали. Отсюда следует, что напряжения в детали являются не самой причиной возникновения трещины, а лишь «катализатором», ускоряющим процессы причинных факторов, приводящих к возникновению трещины, в частности, фреттинг-коррозии, окисление поверхности

материала в области микродефектов и т.д. В то же время растягивающие остаточные напряжения в поверхностном слое детали при возникновении трещины резко снижают предел выносливости по образованию первой макротрещины и, соответственно, коэффициент интенсивности напряжений.

Таким образом, несмотря на наличие пластической области на вершине фронта трещины, нейтрализующей эффект действия остаточных напряжений, общее поле сжимающих остаточных напряжений, а также наличие в нем трещины, не превышающей толщину упрочненного поверхностного слоя, существенно повышают несущую способность детали, а поле растягивающих остаточных напряжений ускоряют развитие трещины.

#### Список литературы

1. Кольцун Ю.И. Определение предела выносливости материала по образованию трещины в условиях концентрации напряжений // Матер. МНТК «Высокие технологии в машиностроении». - Самара. СамГТУ. - 2002г. - С. 102-105.
2. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. - Куйбышев. - 1974. - С.88-95.
3. Иванов С.И., Павлов В.Ф., и др. Технологические остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей. - М.: МАП. - 1992г. - 192с.

### СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНЫХ СИСТЕМ

Леонтьев М.К.

Московский авиационный институт (технический государственный университет), г. Москва

#### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

Последнее время все большую значимость приобрели конечно-элементные системы общего назначения типа NASTRAN, ANSYS, позволяющие решать задачи прочности и динамики для деталей и узлов сложных форм, различного назначения, и в условиях разнообразного нагружения. Также появились тенденции использования такого рода программ для задач, изначально для которых они не были предназначены, и в частности, для задач динамики роторов и сложных роторных систем турбо-